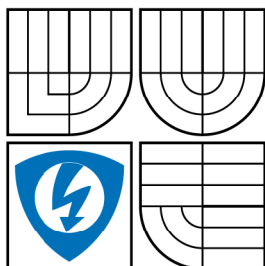


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKACNÍCH  
TECHNologiÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# PRAKTICKÁ REALIZACE GENERÁTORU ŠUMU

REALIZATION OF NOISE GENERATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S PROJECT

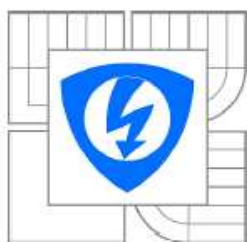
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAKUB KALÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. RADEK KUBÁSEK, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Jakub Kalánek  
**Ročník:** 3

**ID:** 106522  
**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

**Praktická realizace generátoru šumu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vypracujte rešerši generátorů šumu. Vytvořte přehled různých typů a principiálních obvodových zapojení generátorů šumu. Klasifikujte šумы. Realizujte minimálně jednu vybranou variantu generátoru šumu. Ověřte vlastnosti generovaného šumu. Podrobně diskutujte dosažené výsledky..

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ŠEBESTA, V., SMÉKAL, Z. Signály a soustavy. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně.

[2] OPPENHEIM, A. V., SCHAFER R. W., Discrete-Time Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999.

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 28.5.2010

**Vedoucí práce:** Ing. Radek Kubásek, Ph.D.

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jakub Kalánek  
Bytem: Opatov 206, 569 12  
Narozen/a (datum a místo): 13. dubna 1988 ve Svitavách  
(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☐ diplomová práce
- ☒ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....  
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Praktická realizace generátoru šumu

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Radek Kubásek, Ph.D.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 28. května 2010

.....

Nabyvatel

.....

Autor

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá praktickou realizací generátoru šumu. První část je zaměřena na popis náhodného signálu. V druhé části jsou barvy a druhy šumů. Třetí část je zaměřena na použití šumu v praxi. Ve čtvrté části jsou druhy zdrojů šumu. Pátá část je zaměřena na návrh a praktickou realizaci jednoduchého generátoru šumu a testování několika Zenerových diody a nastavení pracovního bodu.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Náhodný signál, bílý šum, generátor šumu, tepelný šum, výstřelový šum, blikavý šum, Zenerova dioda.

## **ABSTRACT**

This work occupy practical realization noise generator. The first part is concentrated on description accidental signal. In the second are color and sorts noises. The third part is concentrated on usage noise in practices. In the fourth part are sorts sources noise. The fifeth part is concentrated on circuit design and design easy noise generator and test Zener diode and set work point.

## **KEYWORDS**

Accidental signal, white noise, noise generator, thermal noise, shot noise, flicker noise, Zener diode.

Kalánek, J. *Praktická realizace generátoru šumu: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 38 s., 5 s. příloh.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Praktická realizace generátoru šumu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Radkovi Kubáskovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>x</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Signál</b>	<b>2</b>
1.1 Dělení signálů.....	2
1.2 Náhodné signály.....	3
1.2.1 Definice náhodného procesu.....	4
1.2.2 Distribuční funkce.....	4
1.2.3 Funkce hustoty rozdělení pravděpodobnosti.....	4
1.2.4 Momenty.....	5
1.2.5 Stacionarita.....	5
1.2.6 Ergodicita.....	5
1.2.7 Spektrální hustota výkonu.....	6
<b>2 Šum</b>	<b>7</b>
2.1 Šumová šířka pásma.....	8
2.2 Šumové číslo.....	8
2.3 Míra šumu.....	9
2.4 Vlastní šumová teplota obvodu.....	9
2.5 Barvy šumu.....	9
2.5.1 Bílý šum.....	10
2.5.2 Růžový šum.....	10
2.5.3 Hnědý (červený) šum.....	11
2.5.4 Modrý (azurový) šum.....	11
2.5.5 Purpurový (fialový) šum.....	11
2.5.6 Šedý šum.....	11
2.5.7 Červený šum.....	11
2.5.8 Oranžový šum.....	12
2.5.9 Zelený šum.....	12
2.5.10 Černý šum.....	12
2.6 Druhy šumu.....	13



2.6.1	Tepelný (Johnsonův) šum .....	13
2.6.2	Výstřelový šum .....	13
2.6.3	Blikavý šum.....	13
2.6.4	Generačně-rekombinační šum.....	14
2.6.5	Praskavý šum (Popcorn noise) .....	14
2.6.6	Celkový šum.....	14
<b>3</b>	<b>Použití šumu</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Šumové generátory</b>	<b>16</b>
4.1	Tepelný šumový generátor .....	16
4.2	Šumový generátor se Zenerovou diodou.....	16
4.3	Šumový generátor se závěrně polarizovaným přechodem BE bipolárního tranzistoru .....	17
4.4	Pseudonáhodné šumové generátory .....	18
<b>5</b>	<b>Praktická realizace generátoru šumu</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>testování zenerových diod</b>	<b>20</b>
6.1	Diody v klasickém pouzdru.....	21
6.2	Diody v SMD pouzdře .....	27
6.3	Nastavení pracovního bodu .....	31
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>32</b>
<b>8</b>	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>33</b>
<b>9</b>	<b>Přílohy</b>	<b>34</b>
9.1	Příloha č. 1 Deska plošného spoje generátoru šumu .....	34
9.2	Příloha č. 2: Rozmístění součástek na desce plošného spoje strana BOTTOM .....	35
9.3	Příloha č. 3: Rozmístění součástek na desce plošného spoje strana TOP .....	36
9.4	Příloha č. 4: Seznam součástek .....	37
9.5	Příloha č. 5: Fotografie generátoru šumu .....	38

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Dělení signálu. ....	2
Obr. 2: Šum .....	7
Obr. 3: Bílý šum .....	10
Obr. 4: Generace a rekombinace .....	14
Obr. 5: Tepelný generátor šumu.....	16
Obr. 6: Generátor šumu se Zenerovou diodou .....	17
Obr. 7: Šumový generátor se závěrně polarizovaným přechodem BE bipolárního tranzistoru.....	17
Obr. 8: Schéma jednoduchého generátoru šumu.....	19
Obr. 9: Typické zapojení zesilovače ERA [12].....	19
Obr. 10: Spektrum šumu spektrálního analyzátoru se vstupem naprázdno .....	20
Obr. 11: Spektrum šumu diody 1N5338B.....	21
Obr. 12: Spektrum šumu diody BZX83V007,5 .....	21
Obr. 13: Spektrum šumu diody 1N5347B.....	22
Obr. 14: Spektrum šumu diody BZX83V010 .....	22
Obr. 15: Spektrum šumu diody BZX83V016 .....	23
Obr. 16: Spektrum šumu diody 1N5357B.....	23
Obr. 17: Spektrum šumu diody Z20.....	24
Obr. 18: Spektrum šumu diody BZX83V020 .....	24
Obr. 19: Spektrum šumu diody 1N5363B.....	25
Obr. 20: Spektrum šumu diody 1N5368B.....	25
Obr. 21: Spektrum šumu diody BZX85V051 .....	26
Obr. 22: Spektrum šumu diody 1N5374 .....	26
Obr. 23: Spektrum šumu diody BZV55C3,9.....	27
Obr. 24: Spektrum šumu diody BZV55C5,1.....	27
Obr. 25: Spektrum šumu diody BZV55C10.....	28
Obr. 26: Spektrum šumu diody BZD27C15.....	28
Obr. 27: Spektrum šumu diody BZV55C20.....	29
Obr. 28: Spektrum šumu diody BZV55C24.....	29
Obr. 29: Spektrum šumu diody BZV49C39.....	30

Obr. 30: Nastavení pracovního bodu.....	31
-----------------------------------------	----

# ÚVOD

Cíle práce je praktická realizace generátoru šumu, který bude schopen generovat šum s konstantní hustotou výkonu. Díky studiu literárních pramenů v oblasti generace náhodných signálů byl navržen jednoduchý generátor šumu, který jako zdroj šumu využívá Zenerovy diody.

V první části této práce se autor zabývá popisem náhodných signálů. Ve druhé části práce jsou popsány jednotlivé barvy a druhy šumů a jejich vlastnosti. Třetí část je zaměřena na praktické využití šumu. Ve čtvrté části práce jsou uvedeny zdroje šumu, které mohou být použity pro generaci šumu a jejich obvodové zapojení. Poslední část je zaměřena na návrh a praktickou realizaci generátoru šumu se Zenerovou diodou a testování různých diod.

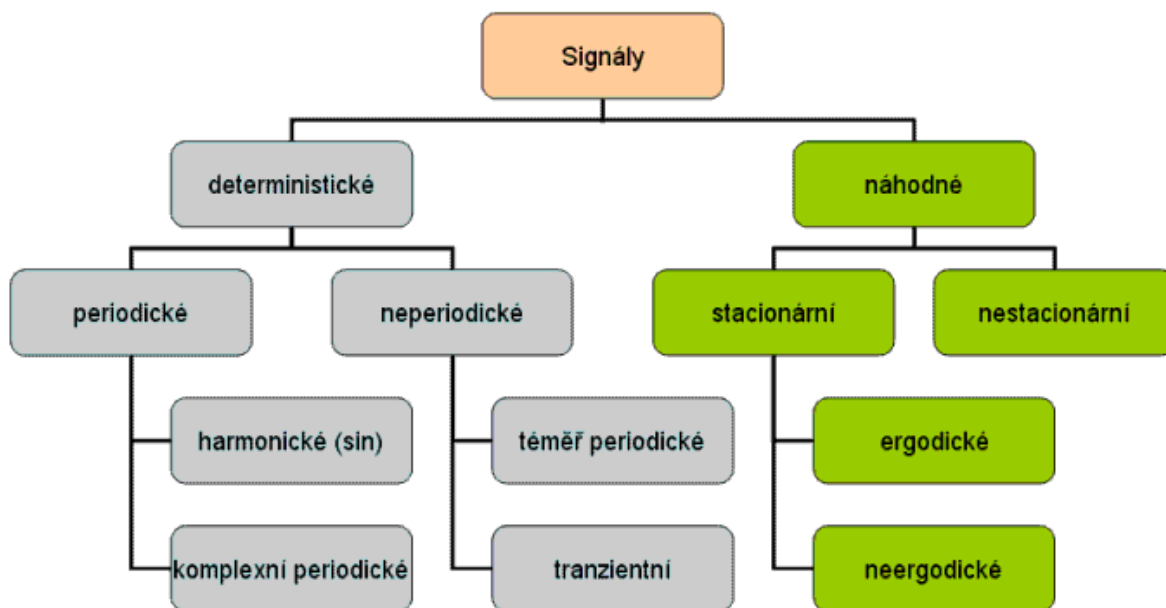
# 1 SIGNÁL

Pohledy na význam slova signál jsou různé. Ani inženýři elektrotechnici se ve výkladu obsahu pojmu slova signál často liší, protože na signál lze pohlížet z mnoha rovin, úrovní a oborů [3].

- signál je časově proměnná fyzikální veličina
- je nositelem (zobrazením) informace.

## 1.1 Dělení signálů

Signály se dělí do mnoha skupin, podle mnoha kritérií. Základní klasifikace signálů je znázorněna na *Obr. 1*.



Obr. 1: Dělení signálu.

## 1.2 Náhodné signály

U náhodných signálů nelze popsat jejich časový průběh. Signály je možné popsat pouze zprostředkovaně jejich charakteristikami. V praxi lze často získat jedinou realizaci náhodného procesu konečné délky, proto nelze určit přesné hodnoty charakteristik, které jsou definovány pro množinu realizací procesu a pro nekonečně dlouhé intervaly pozorování. Hodnoty charakteristik je možné pouze lépe či hůře přesně odhadnout. Náhodné signály lze rozdělit z hlediska závislosti jejich charakteristik na volbě časového okamžiku. Stacionární procesy se nazývají takové procesy, jejichž charakteristiky nejsou závislé na počátku časové osy, to znamená, jsou neproměnné vzhledem k libovolnému posuvu po časové ose. V praxi to znamená, že charakteristiky stacionárních signálů je možné považovat za časově neproměnné (invariantní). Pokud nejsou časově invariantní, jedná se o procesy nestacionární.

Typy charakteristik:

- teoretické charakteristiky (pravděpodobnostní)
- empirické charakteristiky (časové, výběrové)
- odhady charakteristik

Pro určení teoretických charakteristik se vyžaduje úplný (základní) soubor často s nekonečným počtem realizací náhodného procesu. Jedná se o nenáhodné veličiny. Empirické charakteristiky jsou používány v těch případech, kdy je k dispozici pouze jediná realizace (nekonečně dlouhá), nikoliv celý soubor a pokud se určí teoretická charakteristiku náhodného signálu na základě této jediné realizace, je zřejmé, že jsou empirické charakteristiky náhodné. To platí i přesto, že délka realizace je nekonečná. V praxi je délka analyzovaného signálu vždy konečná, proto lze charakteristiky náhodných procesů pouze odhadnout. Tyto odhady jsou náhodné veličiny, jejichž přesnost je ovlivněna spoustou faktorů. Pro kvantitativní popis přesnosti odhadů jsou často používány relativní chyby a intervaly spolehlivosti. Způsob odhadu statistických charakteristik závisí na typu řešené úlohy. Někdy lze použít více realizací naměřených hodnot, jindy realizaci pouze jednu.

Pokud je možné teoretické charakteristiky zaměnit s empirickými charakteristikami, které mají nulový rozptyl, jedná se o takzvané ergodické procesy. V případě současné stacionarity a ergodicity je možné teoretické charakteristiky určované napříč souborem zaměnit empirickými charakteristikami počítanými podél času z jediné realizace. Takovýto postup je v praxi hojně používán, protože v mnoha úlohách je k dispozici pouze jediná realizace náhodného procesu. Ověřování ergodicity nebo striktní ergodicity v praxi vychází velmi často z fyzikálního modelu jeho vzniku

V jistém ohledu je stochastický (náhodný) model zobecněním deterministického modelu, neboť náhodnou veličinou může být chápána i náhodná veličina, která s pravděpodobností rovnou jedné nabývá jen jedné hodnoty. Z hlediska pravděpodobnosti stačí znát o náhodné veličině její distribuční funkci nebo pravděpodobnostní hustotu.

### 1.2.1 Definice náhodného procesu

Pro definici náhodného procesu lze s výhodou použít pojmu náhodná veličina.

Systém  $\{\xi_t\}$  náhodných veličin  $\xi_t$  definovaných pro všechna  $t \in \mathbf{R}$  se nazývá náhodný proces a označuje se  $\xi(t)$ . Veličina  $t$  přitom označuje čas.

Náhodné veličiny  $\xi_t$ , které vytvářejí náhodný proces, musí být plně popsány každá zvlášť, ale musí být také definovány vztahy a souvislosti mezi nimi. Chování jednotlivých náhodných veličin může být popsán distribuční funkcí nebo funkcí hustoty rozdělení pravděpodobnosti. Vzájemné závislosti bývají popsány vícerozměrnými distribučními funkcemi, korelačními funkcemi nebo údaji o statistické nezávislosti [3].

### 1.2.2 Distribuční funkce

Náhodný proces  $\xi(t)$  se pro pevné  $t$  stává náhodnou veličinou, což nám dovoluje definovat distribuční funkci náhodného procesu.

Distribuční funkci  $F(x, t)$  náhodného procesu  $\xi(t)$  definujeme vztahem [3]:

$$F(x, t) = P\{\xi(t) < x\}, \quad (1.1)$$

kde  $P\{\xi(t) < x\}$  označuje pravděpodobnost toho, že náhodný proces  $\xi(t)$  v okamžiku  $t$  nabude hodnoty menší než  $x$ .

Odhad  $\hat{F}(x, t)$  hodnoty funkce  $F(x, t)$  je pro pevný okamžik  $t$  dán vztahem [3]:

$$\hat{F}(x, t) = \frac{q_{x,t}}{n}, \quad (1.2)$$

kde  $q_{x,t}$  je počet případů, kdy  $x_r(t) < x$ ,  $n$  je celkový počet realizací, které jsou k dispozici a  $r$  je index představující identifikační číslo realizace.

### 1.2.3 Funkce hustoty rozdělení pravděpodobnosti

Pomocí distribuční funkce lze snadno definovat funkci hustoty rozdělení pravděpodobnosti náhodného procesu [3].

Existuje-li parciální derivace

$$p(x, t) = \frac{\partial F(x, t)}{\partial x}, \quad (1.3)$$

Nazývá se tato funkce hustoty rozdělení pravděpodobnosti náhodného procesu.

Existují také vícerozměrné distribuční funkce a vícerozměrné funkce hustoty rozdělení pravděpodobnosti. Například dvourozměrná hustota  $p(x_1, x_2, t_1, t_2)$ , kde hodnota  $x_1$  se vztahuje k okamžiku  $t_1$ , podobně  $x_2$  odpovídá okamžiku  $t_2$ . Náhodný proces se nazývá normální, pokud je jeho libovolné rozdělení normální [3].

### 1.2.4 Momenty

Popis náhodného procesu díky momentům bývá méně úplný, než popis pomocí distribučních funkcí nebo funkcí hustoty rozdělení pravděpodobnosti, ale výhodou je, že bývá snazší. Další výhodou je také jednodušší stanovení odhadů momentů [3].

- **Střední hodnota** - Každá možná hodnota  $x$  náhodného procesu  $\zeta(t)$  v momentu  $t$  je násobena elementární pravděpodobností  $p(x,t)dx$ . Součet těchto příspěvků je potom průměrnou hodnotou, která se nazývá střední hodnota. Označuje se  $a(t)$  [3].

$$a(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x,t)dx \quad (1.4)$$

Odhad  $\hat{a}(t)$  střední hodnoty  $a(t)$  lze určit jako aritmetický průměr z hodnot jednotlivých realizací v okamžiku  $t$ .

- **Disperze** - Nebo také rozptyl  $D(t)$ , která slouží k hodnocení rozptýlenosti hodnot náhodného procesu v okamžiku  $t$  okolo střední hodnoty  $a(t)$  [3].

$$D(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - a(t)]^2 p(x,t)dx \quad (1.5)$$

Směrodatná odchylka  $\sigma(t)$  je zavedena jako odmocnina z disperze:

$$\sigma(t) = \sqrt{D(t)} \quad (1.6)$$

### 1.2.5 Stacionarita

Přibližně je stacionární náhodný proces se stálým chováním. Daleko přesněji je stacionární náhodný proces takový náhodný proces, jehož libovolné statické charakteristiky nejsou závislé na libovolném přemístění počátku časové osy. To se projevuje zjednodušením funkcí, které popisují náhodný proces. Funkcím a veličinám  $F(x,t)$ ,  $D(t)$ ,  $p(x,t)$ ,  $a(t)$  a  $\sigma(t)$  po řadě odpovídají veličiny  $F(x)$ ,  $D$ ,  $p(x)$ ,  $a(t)$  a  $\sigma$ . Také lze psát pro libovolné reálné  $t_0$  [3] :

$$p(x_1, x_2, t_1, t_2) = p(x_1, x_2, t_1 + t_0, t_2 + t_0) \quad (1.7)$$

### 1.2.6 Ergodicita

Chce se li na základě experimentu odhadnout funkce nebo veličiny, které popisují náhodný proces, je nutné získat početné množiny realizací, což většinou bývá nesnadné. Z toho to důvodu se často zavádí předpoklad ergodicity náhodného procesu. Ergodický náhodný proces se vyznačuje tím, že všechny jeho realizace mají shodné statické vlastnosti i stejné chování. Což dovoluje, při zkoumání náhodného procesu, odhalovat funkce a veličiny náhodný proces popisující z průběhu jedné libovolné realizace [3].

Odhad střední hodnoty u ergodického náhodného procesu lze získat jako aritmetický průměr z posloupnosti vzorku realizace [3]:



$$\hat{a}(t) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K x(t_i), \quad (1.8)$$

kde  $K$  je počet vzorků a  $x(t_i)$  je  $i$ -tý vzorek, hodnota realizace v okamžiku  $t_i$ .

Také lze použít odhad využívající všechny hodnoty realizace  $x(t)$  v určitém intervalu [3]:

$$\hat{a} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1.9)$$

Odhad bude tím přesnější, čím bude interval  $T$  delší. Tento odhad je prakticky stejnosměrnou složkou realizace  $x(t)$  náhodného procesu  $\zeta(t)$ .

Podobně je možné odhadnout disperzi  $D$  [3]:

$$\hat{D} = \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - a(t)]^2 dt \quad (1.10)$$

Směrodatná odchylka má u procesů, které mají nulovou stejnosměrnou složku význam efektivní hodnoty procesu.

$$\sigma = \sqrt{D} \quad (1.11)$$

### 1.2.7 Spektrální hustota výkonu

Je snaha popsat náhodné procesy jako funkce kmitočtu. Hledat harmonické složky náhodného procesu není ideální přístup, protože amplitudy a počáteční fáze složek, které jsou určeny z jednoho úseku realizace, budou mít jiné hodnoty než amplitudy a počáteční fáze určené z jiného úseku. Pro popis stacionárního nebo ergodického náhodného procesu v kmitočtové oblasti se osvědčila spektrální hustota výkonu, která se označuje  $G(\omega)$ .

Střední výkon  $P$  náhodného procesu, který připadá na pásmo úhlových kmitočtů  $\langle \omega_1, \omega_2 \rangle$  se při dodržení nerovnice  $0 < \omega_1 < \omega_2$  vypočítá dle vztahu [3]:

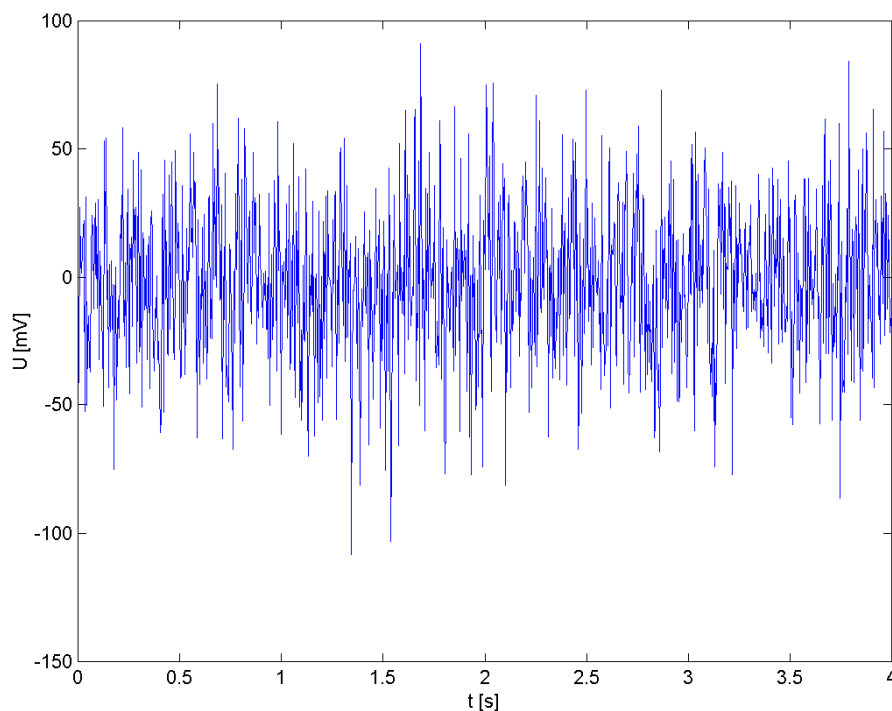
$$P = \int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega) d\omega + \int_{-\omega_2}^{-\omega_1} G(\omega) d\omega = 2 \int_{\omega_1}^{\omega_2} G(\omega) d\omega \quad (1.12)$$

Spektrální hustotu výkonu lze definovat i jako dvojnásobek zavedené hustoty tak, že je používána jen v oblasti kladných úhlových kmitočtů. V praxi se ale místo úhlových kmitočtů používají obyčejné kmitočty, spektrální hustota výkonu se potom udává ve wattech na hertz.

Průběh spektrální hustoty výkonu je důležitým nástrojem při popisu náhodných procesů. Nejznámějším případem je bílý šum, který má spektrální hustotu výkonu konstantní,  $G(\omega) = G$  [3].

## 2 ŠUM

V běžném slova smyslu znamená šum zvukové nebo hlukové znečištění. V elektronice je termín šum používán k označení elektronického signálu korespondujícím s akustickým šumem (v audio-systémech), nebo signálu korespondujícím s vizuálním šumem, který může být viditelný na špatných televizních nebo video snímcích. Vnitřní zdroj šumu obsahuje důležitý typ šumu, ten má původ v samovolném kolísání napětového nebo proudového signálu v elektrických obvodech. Z tohoto důvodu se často nazývá elektrickým šumem. Neodstranitelná přítomnost tohoto typu šumu v elektronických zařízeních způsobuje různá omezení použití těchto zařízení při přenosu signálu nebo při měření. Typická vlastnost šumu je to, že nelze určit přesně jeho výchylku jako funkci času. Ve zpracovávání signálu může šum znamenat data bez významu, tedy data, která nejsou použita pro přenos signálu a jsou tvořena pouze jako nechtěný vedlejší produkt jiných aktivit. V informační teorii ale může šum být považován za informaci. V širším slova smyslu může být zrno filmu nebo třeba reklama na webu považována za šum.



Obr. 2: Šum

Existují dvě kategorie zdrojů šumu

- **Vnější zdroj šumu** - může to být třeba atmosférický šum, galaktický šum a člověk.
- **Vytvořený šum** - do této kategorie jsou zahrnuty také interferující signál, který zachytí přijímač komunikačního systému v důsledku frekvenční charakteristiky systému [4].

Pro optimalizaci šumového chování obvodu je potřeba šumová analýza. K popisu šumu se nejčastěji používá střední šumový výkon nebo střední kvadrát napětí či proudů, které určují šumový výkon. Při analýze je třeba zachytit proměnlivost šumového výkonu při změně kmitočtového pásma. Z tohoto důvodu byl zaveden pojem šumová spektrální hustota výkonu, která je vztažena na šířku pásma 1 Hz [4].

## 2.1 Šumová šířka pásma

Pokud se na vstup dvojbranu přivede šumový signál, který má konstantní spektrální hustotu výkonu, což je bílý šum, pak je na výstupu selektivní barevný šum, jehož spektrální hustota výkonu je maximální na středním kmitočtu  $f_0$ . Šumová šířka pásma, která se označuje  $B_N$ , se pak určí na základě rovnosti celkového šumového výkonu na výstupu dvojbranu a ekvivalentního šumového výkonu, získaného na výstupu obvodu, který má ideální přenosovou charakteristiku. Šumová šířka pásma se vypočítá dle následujícího vzorce [4]:

$$B_N = \frac{1}{p(f_0)} \int_0^\infty p(f) df \quad (2.1)$$

Z uvedené rovnice je vidět, že šumová šířka pásma  $B_N$  není rovna šířce pásma  $B$ , která je určena pro pokles o 3 dB, ale je větší, což nepřímo závisí s řádem selektivního obvodu.

## 2.2 Šumové číslo

Šumové číslo se označuje  $F$ . A bylo zavedeno pro popis šumových vlastností lineárních obvodů. Pro jeho definici je zaveden výkonový poměr signálu a šumu na vstupu  $P_{Si}/P_{Ni}$  a na výstupu  $P_{So}/P_{No}$  a pro generátor je určena normální teplota  $T_0 = 290$  K. Pak je šumové číslo určeno vztahem [4]:

$$F = \frac{P_{Si}/P_{Ni}}{P_{So}/P_{No}} \quad (2.2)$$

Tento vzorec udává, kolikrát se zhorší poměr signál/šum po průchodu signálu obvodem oproti původní hodnotě  $P_{Si}/P_{Ni}$ , pokud budou platit podmínky oboustranného výkonového přizpůsobení. Kdyby obvod neobsahoval žádné zdroje šumu, pak by bylo šumové číslo  $F = 1$  [4].

Vyjádření šumového čísla v decibelech:

$$F_{dB} = 10 \log F \quad (2.3)$$

V praxi bývá obvod tvořen kaskádou  $n$  dvojbranů, které mají různá šumová čísla  $F_1, F_2, \dots, F_n$  a výkonová zesílení  $A_{P1}, A_{P2}, \dots, A_{Pn}$ . Celkové šumové číslo takovéto kaskády je dáno vztahem [4]:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{A_{P1}} + \frac{F_3 - 1}{A_{P1} \cdot A_{P2}} + \dots + \frac{F_n - 1}{\prod_{i=1}^{n-1} A_{Pi}} \quad (2.4)$$

Jak je ze vztahu patrné, největší vliv na celkové šumové číslo má první blok, což je velmi důležitý fakt při konstrukci vstupní části obvodových systémů.

## 2.3 Míra šumu

Z důvodu, že celkové šumové číslo  $F$  nezávisí pouze na šumových číslech jednotlivých dvojbranů  $F_i$ , ale závisí i na výkonových přenosech  $A_{Pi}$ , byla zavedena míra šumu, která je definována vztahem [4]:

$$M_i = \frac{F_i - 1}{1 - \frac{1}{A_{Pi}}} \quad (2.5)$$

Většinou je míra šumu používána ke stanovení pořadí jednotlivých bloků kaskády, když mají jednotlivé dvojhrany různá šumová čísla a také různá výkonová zesílení. Aby mělo kaskádní zapojení co nejmenší šumové číslo  $F$ , musejí se dvojhrany řadit postupně za sebou tak, aby byl na vstupu ten dvojbran, který má nejmenší míru šumu a dále se dvojhrany řadí podle stoupající míry šumu  $M$  [4].

## 2.4 Vlastní šumová teplota obvodu

Některé obvody mají nízké šumové číslo. Mnohem lepší je vyjádřit šumové vlastnosti takového obvodu díky jeho vlastní šumové teplotě, která je dána vztahem [4]:

$$T = (F - 1) \cdot T_0, \quad (2.6)$$

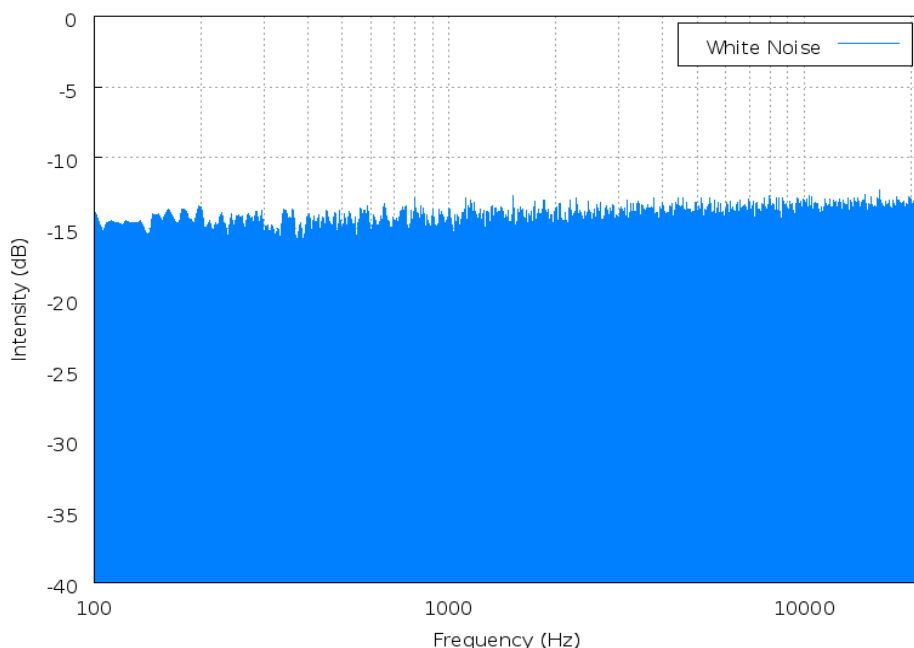
kde  $T_0 = 290$  K.

## 2.5 Barvy šumu

Názvy barev pro různé typy šumu byly vytvořeny jako přibližná analogie mezi jejich frekvenčním spektrem a spektrem barevného světla. Tedy spektrum „modrého šumu“ odpovídá spektru světla s modrým odstínem atd. [6].

### 2.5.1 Bílý šum

Bílý šum je náhodný signál (nebo proces) s konstantní výkonovou spektrální hustotou. Stejně široká frekvenční pásma mají tedy stejnou energii. Například rozsah frekvencí 20 Hz mezi 40 a 60 Hz má stejnou energii jako rozsah frekvencí mezi 4000 a 4020 Hz. Bílý šum dostal název podle analogie s bílým světlem, které obsahuje rovnoměrně zastoupené všechny frekvence [6].



Obr. 3: Bílý šum

Nekonečný vlnový rozsah signálu bílého šumu je pouze teoretický, v praxi je šum označován jako „bílý“ pokud má ploché spektrum v definovaném rozsahu frekvencí.

### 2.5.2 Růžový šum

Růžový šum také známý jako „ $1/f$  šum“ je signál nebo proces, jehož výkonová frekvenční hustota je přímo úměrná převrácené hodnotě frekvence. Tedy při zdvojnásobení frekvence klesne energie o 3 dB. Energie je stejná v pásmech stejně širokých v logaritmických souřadnicích, např. ve všech oktávách. To odpovídá logaritmickému charakteru lidského vnímání. Růžovým šumem se proto často testují zvukové systémy, aby se zjistilo, zda mají v celém rozsahu požadovaný přenos.

Svémi vlastnostmi leží růžový šum mezi šumem bílým a červeným, tomu odpovídá i jeho název [6].

### 2.5.3 Hnědý (červený) šum

Hnědý šum je podobný růžovému šumu, ale s výkonovou frekvenční hustotou sniženou o 6 dB za oktávu se zvyšující se frekvencí (hustota je úměrná  $1/f^2$ ) do rozsahu frekvencí, který nezahrnuje stejnosměrný proud (DC). Může být generován algoritmem, který simuluje Brownův pohyb nebo integrováním bílého šumu. Hnědý šum není pojmenován podle výkonového spektra, které naznačuje hnědá barva, ale podle zkomolení z Brownova pohybu. Je také znám jako „náhodná procházka“ nebo „opilcova chůze“. (Nelze ho však zaměňovat s infrazvukovým hnědým znamením, které prý lidem způsobuje ztrátu kontroly nad jejich vnitřnostmi.) [6].

### 2.5.4 Modrý (azurový) šum

Výkonová frekvenční hustota modrého šumu se zvyšuje o 3 dB za oktávu se zvyšující se frekvencí (hustota je úměrná  $f$ ) do konečného frekvenčního rozsahu. V počítačové grafice je termín „modrý šum“ někdy užívaný volněji jako jakýkoli šum s minimální nízkou frekvencí bez výkyvů výkonu.

To může být dobrý zvuk pro úpravu chyb ve zvukových záznamech [6].

### 2.5.5 Purpurový (fialový) šum

Výkonová frekvenční hustota purpurového šumu se zvyšuje o 6 dB za oktávu s rostoucí frekvencí (hustota úměrná  $f^2$ ) do konečného rozsahu frekvencí. Je také znám jako odlišený bílý nebo fialový šum [6].

### 2.5.6 Šedý šum

Šedý šum je šum používaný v psychoakustice k měření křivky hladiny hlasitosti (křivka která znázorňuje vliv frekvence na hlasitost signálu, při kterém posluchač začne pociťovat konstantní hluk) do stanoveného rozsahu frekvencí, takže zní stejně hlasitě na všech frekvencích. Někteří lidé říkají, že toto může být lepší definice bílého šumu než definice „stejný výkon na všech frekvencích“, protože bílé světlo nikdy nemá stejný výkon spektra, ale spíše může mít rozsah spektra [6].

### 2.5.7 Červený šum

Červený šum má více než jednu definici:

- Synonymum pro hnědý šum
- Synonymum pro růžový šum
- Oceánský okolní šum (to je šum ze vzdálených zdrojů) je často popisován jako „červený“ kvůli selektivní absorpci vyšších frekvencí oceánem [6].

### 2.5.8 Oranžový šum

Oranžový šum je skoro stálý šum s ohraničeným výkonovým spektrem s omezeným počtem malých skupin nul rozptýleným rovnoměrně po celém spektru. Tyto skupiny nulové energie jsou soustředěny okolo frekvencí muzikálních not v jakékoli stupnici. Protože všechny sladěné hudební noty jsou eliminovány, zbývající spektrum se zdá být složeno z trpkých, citrónových a „pomerančových“ not. Oranžový šum je nejjednodušeji vyprodukovatelný v místnosti, která je plná žáků první třídy vybavených plastickými audiorekordéry [6].

### 2.5.9 Zelený šum

- Zelený šum je pravděpodobně podkladový zvuk Země. Výkonové spektrum zprůměrované z několika míst. Spíše jako růžový šum navíc s hrbolem okolo 500 Hz.
- Střední frekvence bílého šumu.
- Ohraničený hnědý šum [6].

### 2.5.10 Černý šum

- Ticho
- Šum se spektrem  $1/f^x$ , kde  $x > 2$ . Používaný k modelování různých procesů vyskytujících se v životním prostředí. Říká se, že to je charakteristika „přírodních a nepřírodních katastrof jako povodně, sucho, stagnace nebo různé poruchy, jako např. výpadky elektrického proudu“. Dále prý kvůli jejich černému spektru tyto katastrofy často přicházejí ve skupinách.
- Šum, jehož spektrum má nulový výkon ve všech frekvenčních pásmech kromě několika úzkých pásem či špiček. Příkladem černého šumu v systému pro přenos faxů je spektrum, které vzniká při skenování černého papíru, na kterém je několik náhodných bílých teček. Během skenování se tak v časové oblasti vyskytne několik náhodných pulsů.
- Výstup z aktivního systému pro potlačování šumu, který vyruší existující šum a vytvoří prostředí bez šumu.
- Podle prospektů k ultrazvukovým odpuzovačům hmyzu je to šum s výkonovou hustotou, která je konstantní pro omezený rozsah frekvencí nad 20 kHz. Tedy ultrazvukový bílý šum. Tento černý šum je analogický takzvanému černému (ultrafialovému) světlu s frekvencemi příliš vysokými na zaznamenání, ale schopnými ovlivnit okolí [6].

## 2.6 Druhy šumu

### 2.6.1 Tepelný (Johnsonův) šum

Tepelný (termický) šum (Johnsonův) je generován ve všech součástkách obsahujících volné elektrony (ve vodičích i polovodičích), v důsledku jejich náhodného pohybu, při libovolné teplotě vyšší než absolutní 0 K. Tento šum je nezávislý na velikosti protékajícího proudu rezistorem, či na velikosti přiloženého napětí. Nejprve je však zřetelný šumu samotného rezistoru [1].

Střední kvadrát tepelného šumového napětí rezistoru je dán vztahem

$${}_{TN}U^2 = 4kTRB \quad (2.1)$$

kde  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K] je Boltzmannova konstanta,

$T$  je absolutní teplota rezistoru v Kelvinech,

$R$  je odpor rezistoru [ $\Omega$ ],

$B_N$  je tzv. šumová šířka pásma (není totožná s pásmem  $B$  přenášených signálů).

### 2.6.2 Výstřelový šum

Vyskytuje se u všech součástek, kde se využívá přechodu PN. Vzniká v důsledku toho, že nosiče náboje vznikají a rekombinují na přechodu nespojitě - po kvantech. Tento typ má také charakter bílého šumu (konstantní spektrální výkonovou hustotu). Podle Schottkyho je střední kvadrát výstřelkového šumového proudu určen vztahem [1].

$$I^2 = 2qI B \quad (2.2)$$

kde  $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  [C] je náboj elektronu,

$I$  je stejnosměrný proud procházející PN přechodem,

$B$  je šumová šířka pásma.

Při malém proudu  $I$  přes přechod PN, převažuje zde výstřelkový šum nad termickým.

Model přechodu PN je tvořen proudovým zdrojem výstřelového šumu o hodnotě dané vztahem [3]. Ten někdy bývá doplněn paralelně připojenou „nešumící“ efektivní vodivostí přechodu, která je přímo úměrná procházejícímu proudu  $I$ .

### 2.6.3 Blikavý šum

Blikavý (plápolavý, růžový) šum se vytváří v důsledku poruch krystalové mříže a nečistot v polovodiči. Projevuje se především na nižších kmitočtech. Jeho spektrální hustota výkonu klesá směrem k vyšším kmitočtům a to s kmitočtovou závislostí  $1/f$  (proto se někdy také nazývá – šum  $1/f$ ). Závisí rovněž na proudu  $I$  polovodičem. Jedná se o nízkofrekvenční šum uplatňující se prakticky pouze ve frekvenčním pásmu 0,1 až 10 Hz [1].

$$i^2 = KF \cdot I_{AF} / f \quad (2.3)$$



kde  $KF$  = koeficient blikavého šumu (Flicker Noise Coefficient),

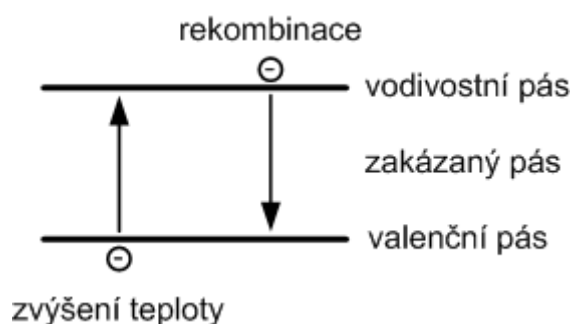
$AF$  = exponent blikavého šumu (Flicker Noise Exponent).

U MOSFETů je modelování šumu poměrně komplikované.

Standardní nastavení parametrů modelů diod a tranzistorů BJT:  $KF = 0$ ,  $AF = 1$ , parazitní odpory diody  $R_S$  a tranzistoru  $R_B$ ,  $R_C$ ,  $R_E$  jsou nulové. Při tomto standardním nastavení se neuplatňují ani tepelné šумы, ani blikavý šum, pouze výstřelový šum, jehož účinky jsou přímo úměrné nastaveným klidovým proudům.

## 2.6.4 Generačně-rekombinační šum

generačně-rekombinační šum je vyvolán náhodnými změnami generační a rekombinační rychlostí nosičů náboje. Vyskytuje se pouze u polovodičových detektorů. Fluktuace počtu elektronů zaznamenáváme jako signál [1].



Obr. 4: Generace a rekombinace

## 2.6.5 Praskavý šum (Popcorn noise)

Tento druh šumu vzniká zejména v přechodu báze-emitor a je způsoben znečištěním oblasti emitoru ionty těžkých kovů. Vyznačuje se skoky mezi diskrétními šumovými úrovněmi. Jedná se především o proudový šum a uplatňuje se při vysokých vstupních impedancích. Jeho doba trvání je od mikrosekund až do sekund [1].

## 2.6.6 Celkový šum

Z důvodu, že jednotlivé šумы mají náhodný charakter, musí být sčítány jejich druhé mocniny efektivních hodnot [1].

### 3 POUŽITÍ ŠUMU

- **V architektonické akustice** - zde se bílý šum využívá k omezení rozptylujících se nežádoucích zvuků ve vnitřních prostorech. Pouští se nízká hladina šumu jako podkladový zvuk
- **V sirénách** - bílý šum se používá u některých sirén pohotovostních vozidel, protože má schopnost proniknout ostatními zvuky prostředí a nezpůsobuje ozvěnu, což umožní snazší určení směru, odkud přichází.
- **V elektronické hudbě** - zde je bílý šum používán přímo jako vstupní signál pro filtr k vytvoření ostatních typů šumových signálů nebo se využívá při syntéze zvuku, k napodobení perkusních nástrojů jako jsou například činely, které mají ve spektru silnou šumovou složku.
- **V ekvalizéru** - zde se šum využívá k nastavení ekvalizéru při ozvučování koncertů nebo jiných představení.
- **U zesilovačů** - kde je bílý šum používán k testování přenosové charakteristiky zesilovačů a elektrických filtrů.
- **U generátorů náhodných čísel** - kde je bílý šum základem generátorů náhodných čísel
- **Brainwashing** - bílý šum se používá ke zmatení jedinců před výslechem a také jako součást techniky smyslové deprivace

Dále se šum používá pro ochranu soukromí při konverzaci, pro podporu spánku a k zamaskování hučení v uších.

## 4 ŠUMOVÉ GENERÁTORY

Šumové generátory se používají při širokopásmovém měření kmitočtových charakteristik obvodů. Jako zdroj šumu se používají vyhřívané rezistory, závěrně polarizované Zenerovy diody, BE bipolární tranzistory [2].

### 4.1 Tepelný šumový generátor

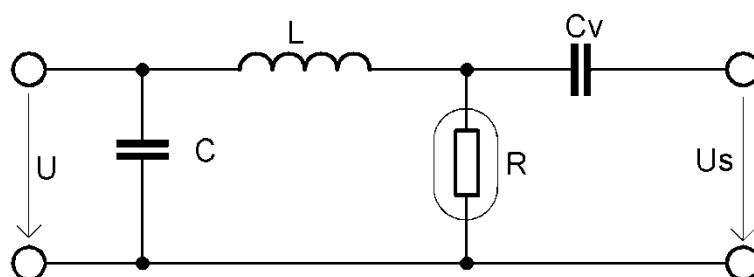
Tento generátor šumu využívá tepelný šum vyhřívaného rezistoru. Jeho efektivní hodnota napětí je v kmitočtovém pásmu  $\Delta f$  rovna [2].

$$U_n = 2\sqrt{k\Theta R\Delta f} \quad (3.1)$$

,kde  $k$  je Boltzmannova konstanta,

$R$  je odpor rezistoru,

$\Theta$  je jeho absolutní teplota.



Obr. 5: Tepelný generátor šumu

Vysokoohmový rezistor je hermetizován ve skleněném pouzdru a vyhříván stejnosměrným proudem na teplotu několika set °C. Filtrační LC obvod zamezuje pronikání šumového napětí do napájecího zdroje. Vazební kondenzátor  $C_v$  určuje dolní mezní kmitočet pásma přenášeného šumového signálu. Tyto zdroje generují šumový signál s normálním rozložením amplitud.

### 4.2 Šumový generátor se Zenerovou diodou

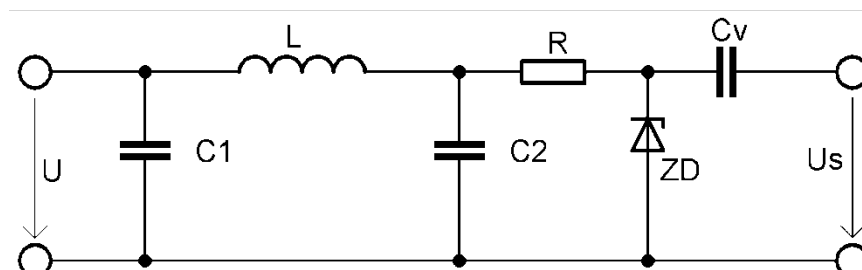
Tento generátor pracuje díky výstřelovému šumu závěrně polarizovaném přechodu Zenerovy diody, jehož efektivní hodnota je [2].

$$U_n = r_{zd} \sqrt{2qI_{zd}\Delta f} \quad (3.2)$$

Kde  $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C je náboj elektronu,

$r_{ZD}$  je diferenciální odpor Zenerovy diody,

$I_{ZD}$  je její proud.

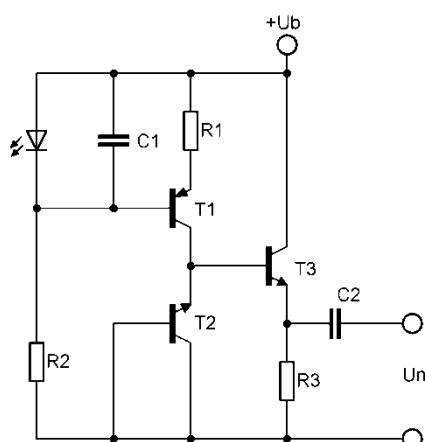


Obr. 6: Generátor šumu se Zenerovou diodou

Pro dosažení maximální hodnoty šumového napětí, je vhodné zvolit pracovní bod Zenerovy diody v kolenu její závěrné charakteristiky. Generovaný šum má téměř normální rozložení.

### 4.3 Šumový generátor se závěrně polarizovaným přechodem BE bipolárního tranzistoru

Má velmi podobné vlastnosti jako zdroj se Zenerovou diodou. Má větší kmitočtový rozsah, protože má menší parazitní kapacity přechodu BE. Přechod BE tranzistoru  $T_2$  je napájen ze zdroje proudu s tranzistorem  $T_1$ , který je stabilizován pomocí LED diody. Kvůli impedančnímu oddělení zdroje šumu je použit tranzistor  $T_3$ , který je zapojen jako sledovač napětí s vysokým vstupním odporem. Vazební kondenzátor  $C_2$  určuje dolní mezní kmitočet přenášeného pásma šumového napětí. Pokud se použijí vysokofrekvenční tranzistory s horním mezním kmitočtem 1 GHz, je možné generovat šumové napětí v rozsahu stovek MHz [2].



Obr. 7: Šumový generátor se závěrně polarizovaným přechodem BE bipolárního tranzistoru

## 4.4 Pseudonáhodné šumové generátory

Pro generaci náhodného signálu užívají pseudonáhodnou generaci čísel. Ta je možná realizovat pomocí kruhového posuvného registru se zpětnou vazbou s obvodem nonekvivalence EX-OR, který realizuje součet modulo .

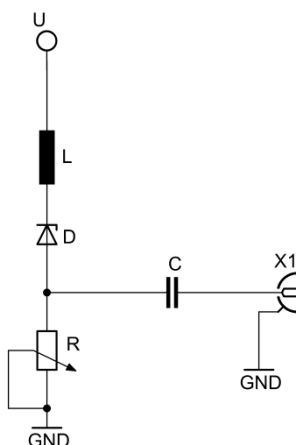
Maximální délka generované posloupnosti (opakovatelnost kódových slov) je u  $n$ -bitového registru [2].

$$M = 2^n - 1 \quad (3.3)$$

Četnost výskytu jednotlivých hodnot generovaných čísel je pro všechna čísla stejná a konstantní, je tedy možné při použití lineárního Č/A převodníku generovat spojitý signál s rovnoměrným rozložením. Je-li potřeba jiné rozložení amplitud, než rovnoměrné, je možné pomocí číslicového dekodéru s pamětí typu PROM realizovat libovolné amplitudové rozložení. Nevýhodou takovýchto generátorů je omezené kmitočtové spektrum signálu, dané vzorkovacím kmitočtem  $f_v$  [2].

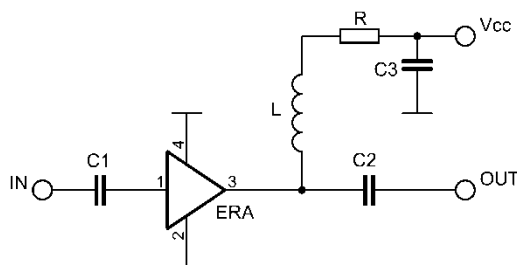
## 5 PRAKTICKÁ REALIZACE GENERÁTORU ŠUMU

Jako zdroj šumu, pro praktickou realizaci generátoru šumu, byla vybrána Zenerova dioda. Schéma tohoto generátoru šumu je zobrazeno na *Obr. 8*.



Obr. 8: Schéma jednoduchého generátoru šumu

Pro zesílení signálu generovaného generátorem šumu byl použit zesilovač, který je zkonstruován jako tří stupňové zapojení mikrovlnného monolitického integrovaného obvodu ERA. Jeho vnitřní odpor je 50  $\Omega$ . Typické zapojení je znázorněno na *Obr. 9*.

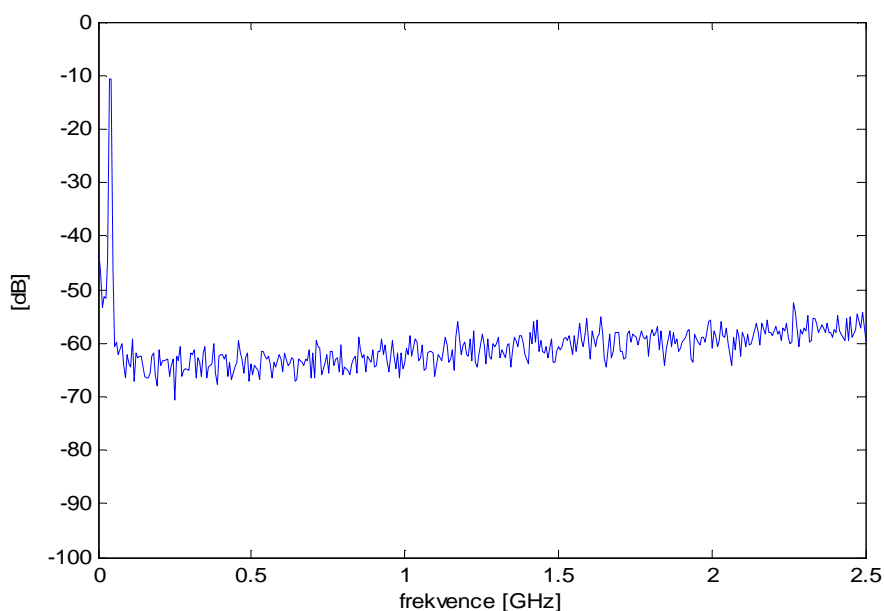


Obr. 9: Typické zapojení zesilovače ERA [12]

Obvod je navrhnut na jednostrannou desku plošného spoje, návrh desky plošného spoje je v *Příloze č. 1*, kde černá barva představuje vrstvu mědi. V *Příloze č. 2 a 3* je zobrazeno rozmístění součástek na desce plošného spoje. V obou případech je použito měřítko zobrazení 2:1.

## 6 TESTOVÁNÍ ZENEROVÝCH DIOD

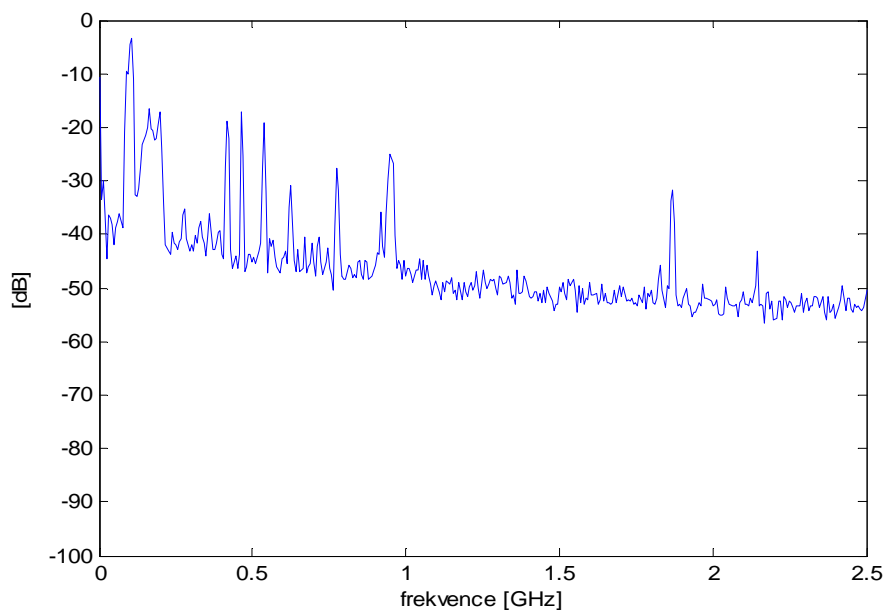
Nejprve bylo zaznamenáno spektrum šumu spektrálního generátoru se vstupy naprázdno. Na generátor šumu bylo přivedeno příslušné napětí o velikosti dané měřenou diodou. Pomocí osciloskopu byl nastaven pracovní bod do kolena voltampérové charakteristiky Zenerovy diody. Poté se generátor připojil ke spektrálnímu analyzátoru a bylo zachyceno spektrum šumu.



Obr. 10: Spektrum šumu spektrálního analyzátoru se vstupy naprázdno

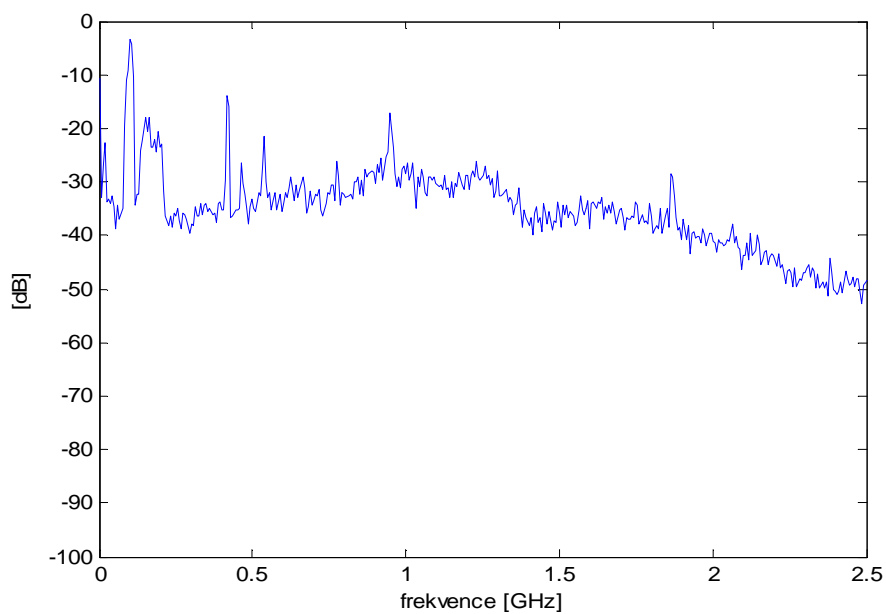
## 6.1 Diody v klasickém pouzdru

- Dioda **1N5338B** na 5,1 V



Obr. 11: Spektrum šumu diody 1N5338B

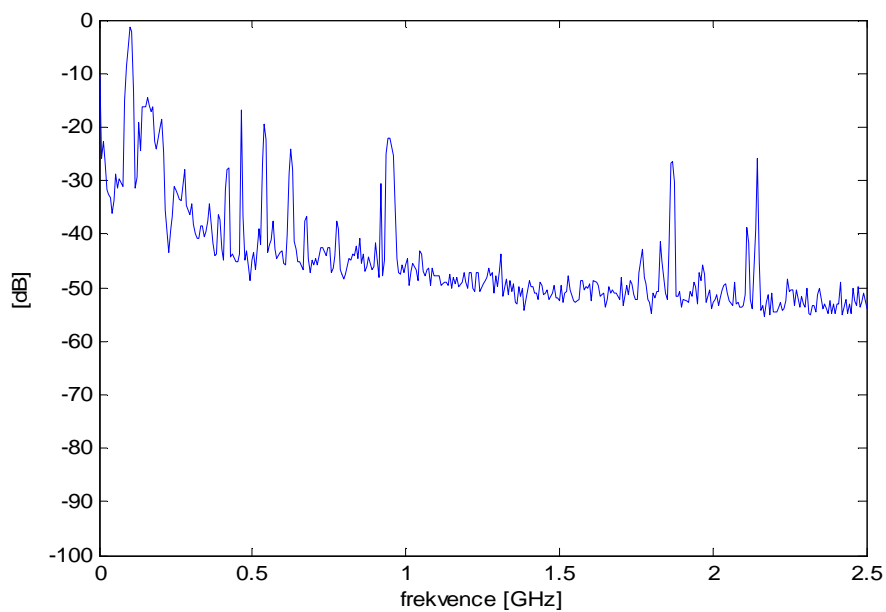
- Dioda **BZX83V007,5** na 7,5 V



Obr. 12: Spektrum šumu diody BZX83V007,5

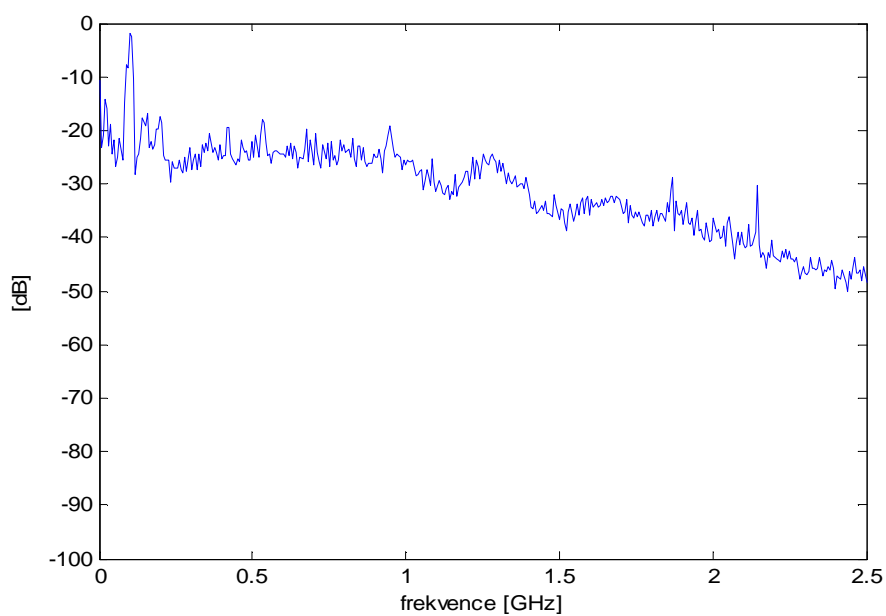


➤ Dioda **1N5347B** na 10 V



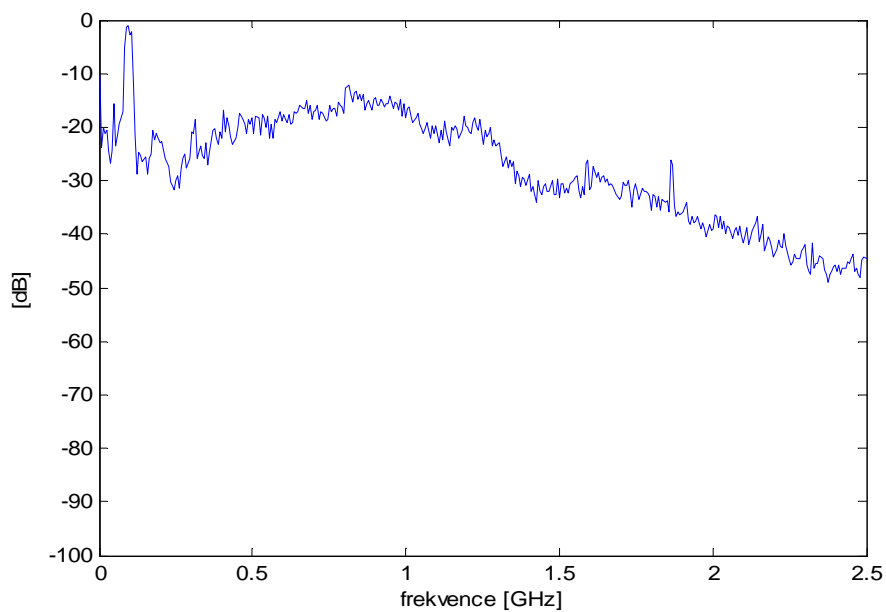
Obr. 13: Spektrum šumu diody 1N5347B

➤ Dioda **BZX83V010** na 10 V



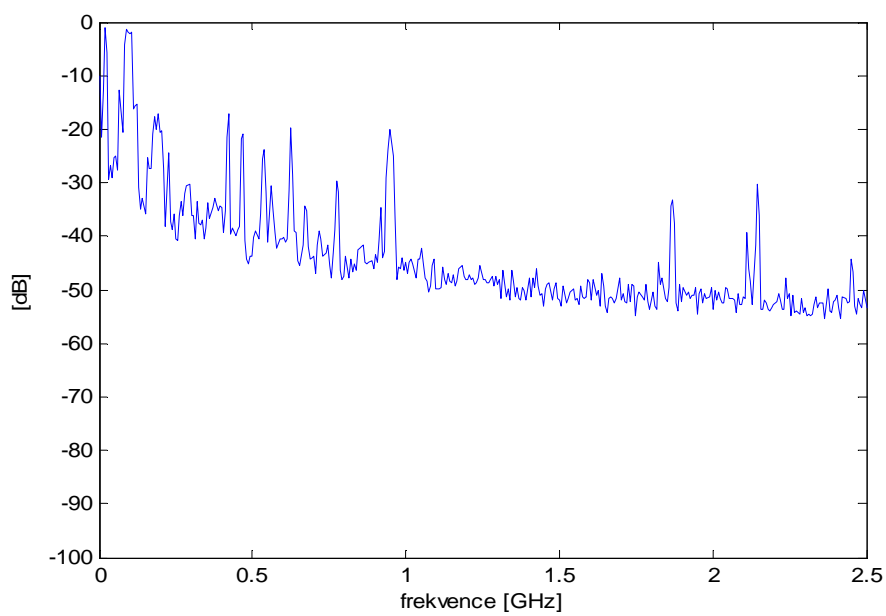
Obr. 14: Spektrum šumu diody BZX83V010

➤ Dioda **BZX83V016** na 16 V



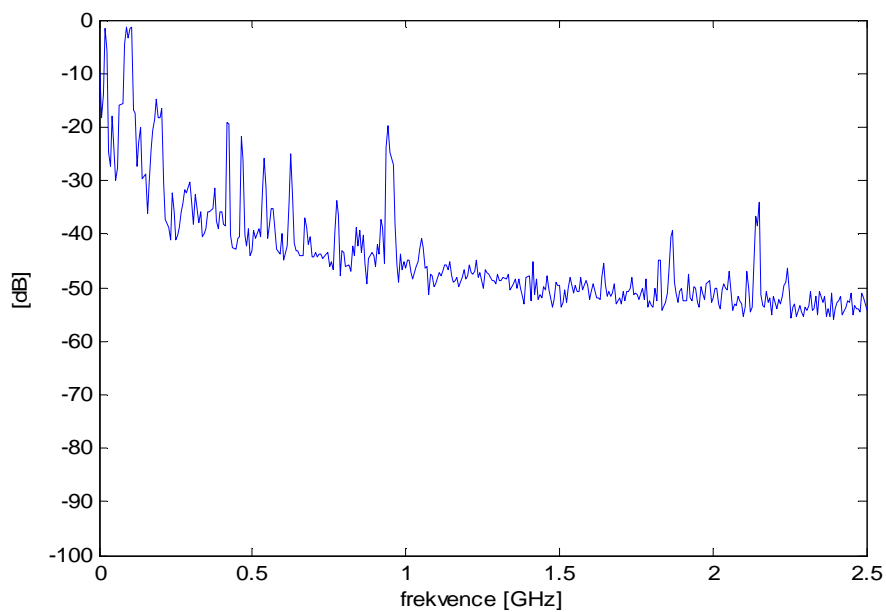
Obr. 15: Spektrum šumu diody BZX83V016

➤ Dioda **1N 5357B** na 20 V



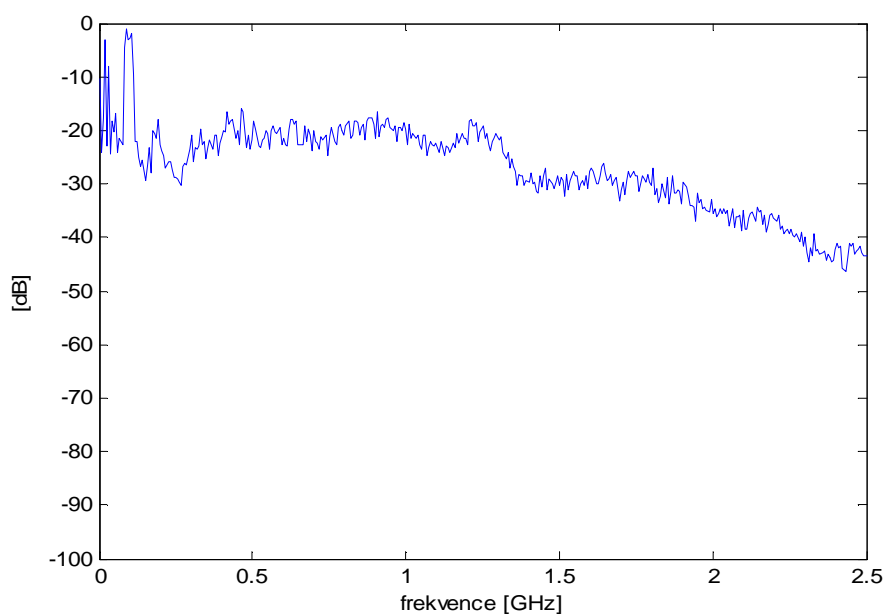
Obr. 16: Spektrum šumu diody 1N5357B

➤ Dioda **Z20** na 20 V



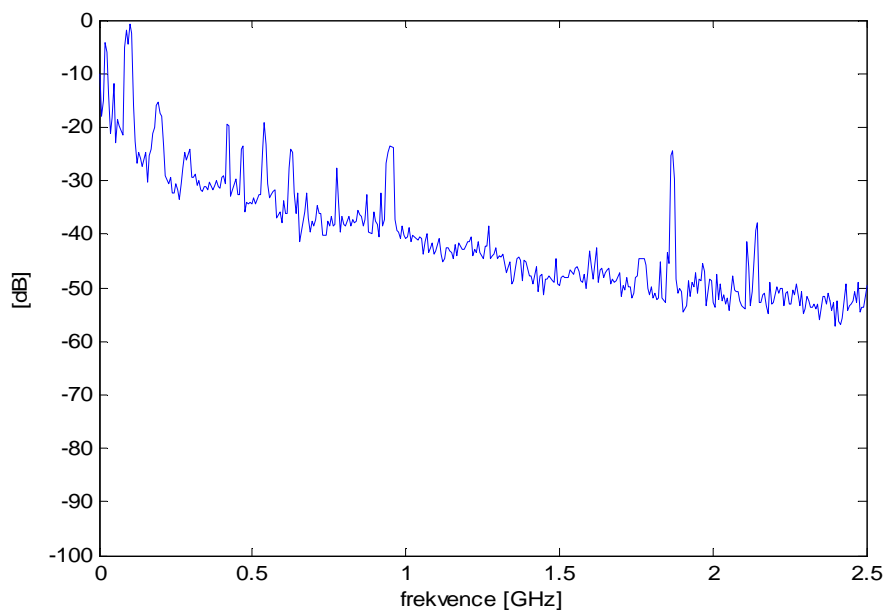
Obr. 17: Spektrum šumu diody Z20

➤ Dioda **BZX83V020** na 20 V



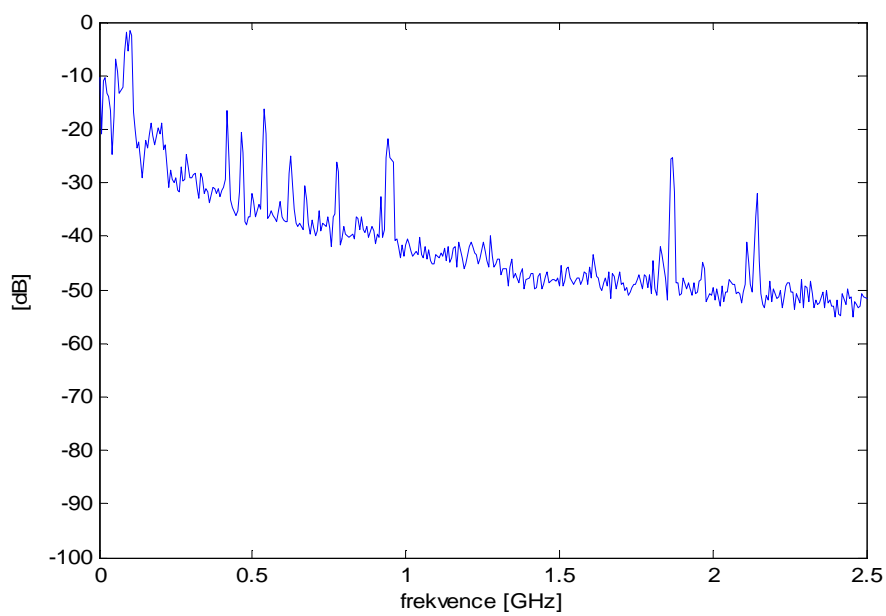
Obr. 18: Spektrum šumu diody BZX83V020

➤ Dioda **1N5363B** na 30 V



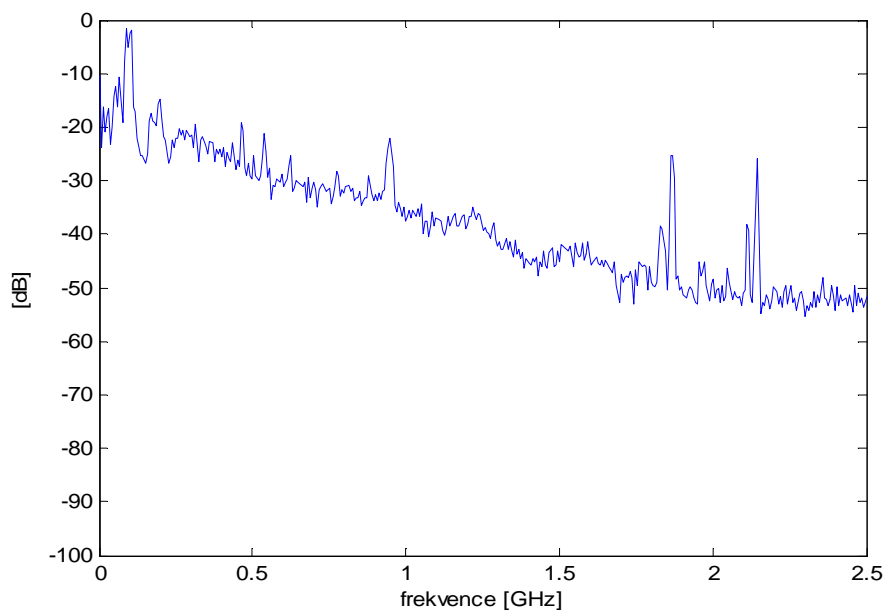
Obr. 19: Spektrum šumu diody 1N5363B

➤ Dioda **1N5368B** na 47 V



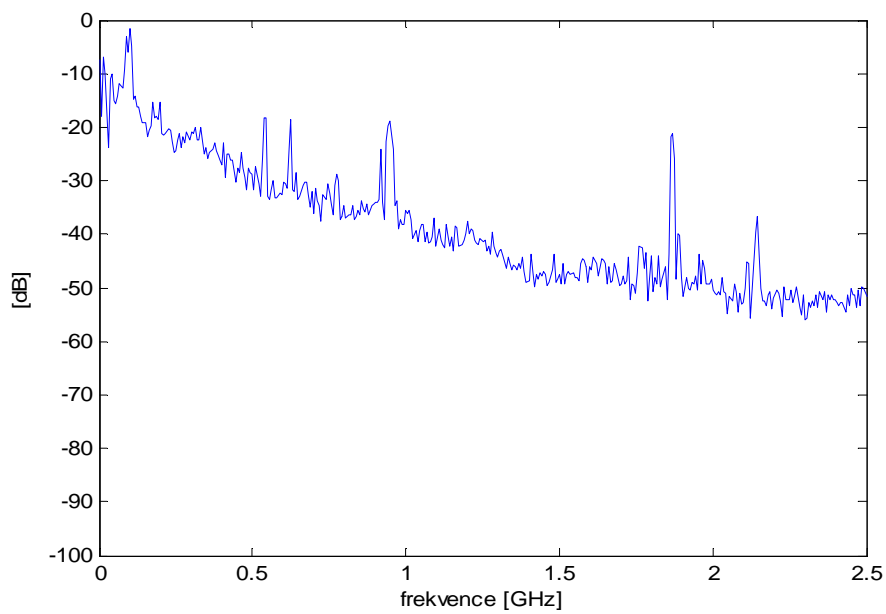
Obr. 20: Spektrum šumu diody 1N5368B

➤ Dioda **BZX85V051** na 51 V



Obr. 21: Spektrum šumu diody BZX85V051

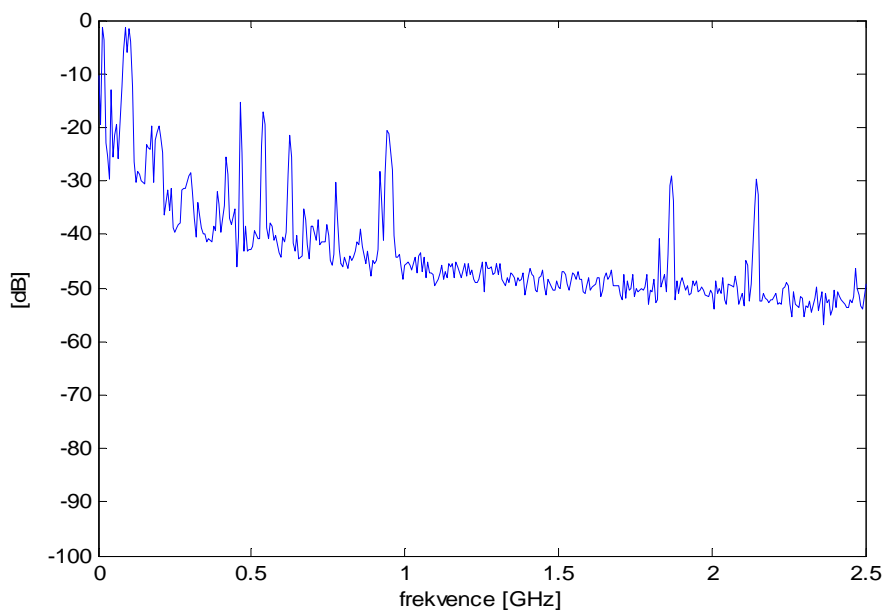
➤ Dioda **1N5374B** na 75 V



Obr. 22: Spektrum šumu diody 1N5374

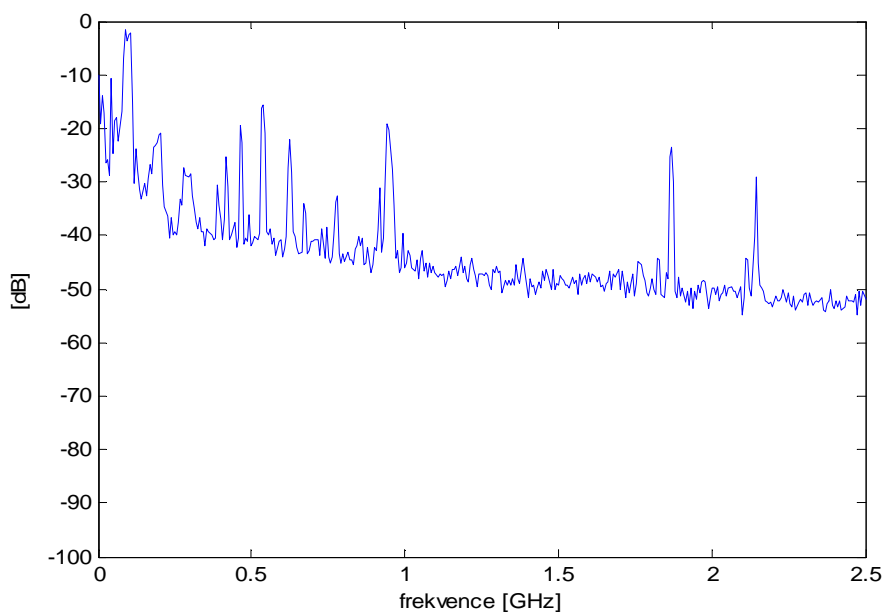
## 6.2 Diody v SMD pouzdře

- Dioda **BZV55C3,9** na 3,9 V



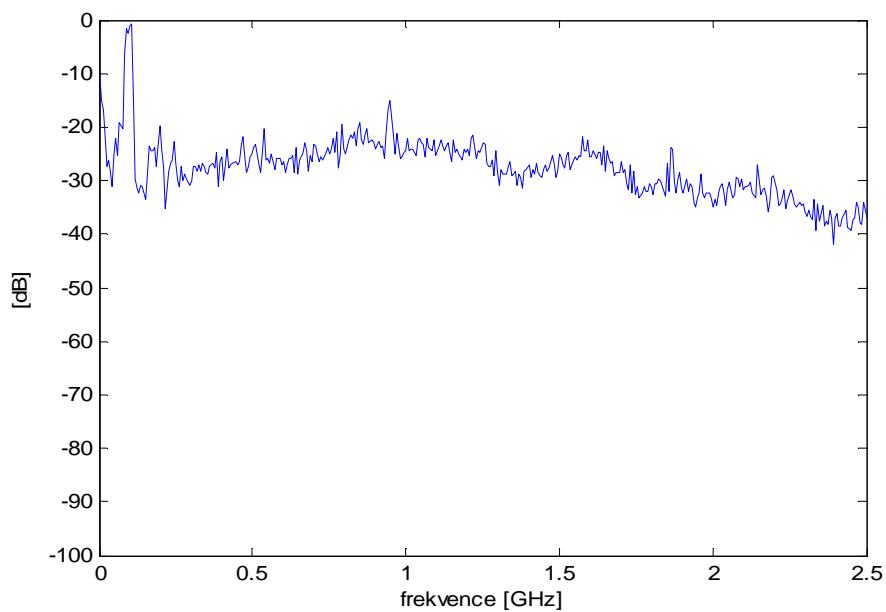
Obr. 23: Spektrum šumu diody BZV55C3,9

- Dioda **BZV55C5,1** na 5,1 V



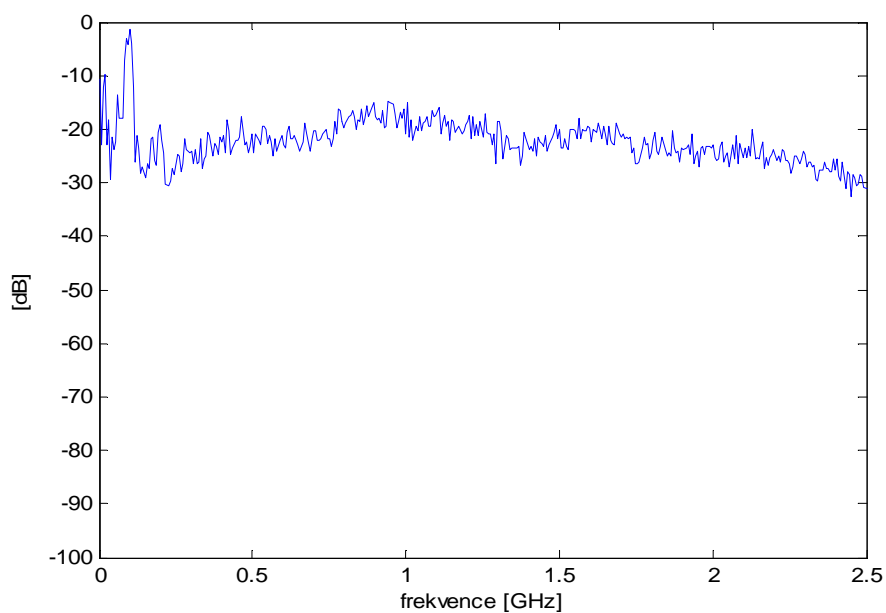
Obr. 24: Spektrum šumu diody BZV55C5,1

➤ Dioda **BZV55C10** na 10 V



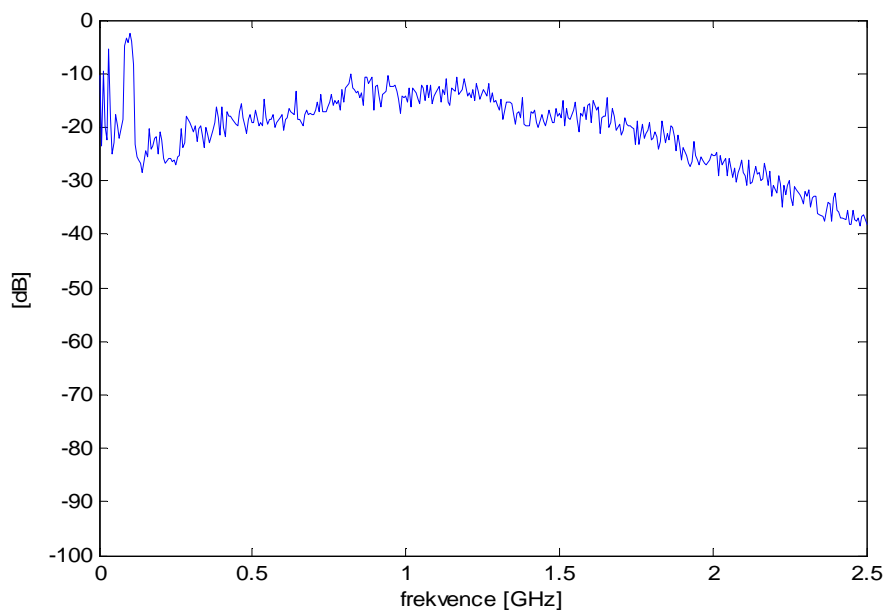
Obr. 25: Spektrum šumu diody BZV55C10

➤ Dioda **BZD27C15** na 15 V



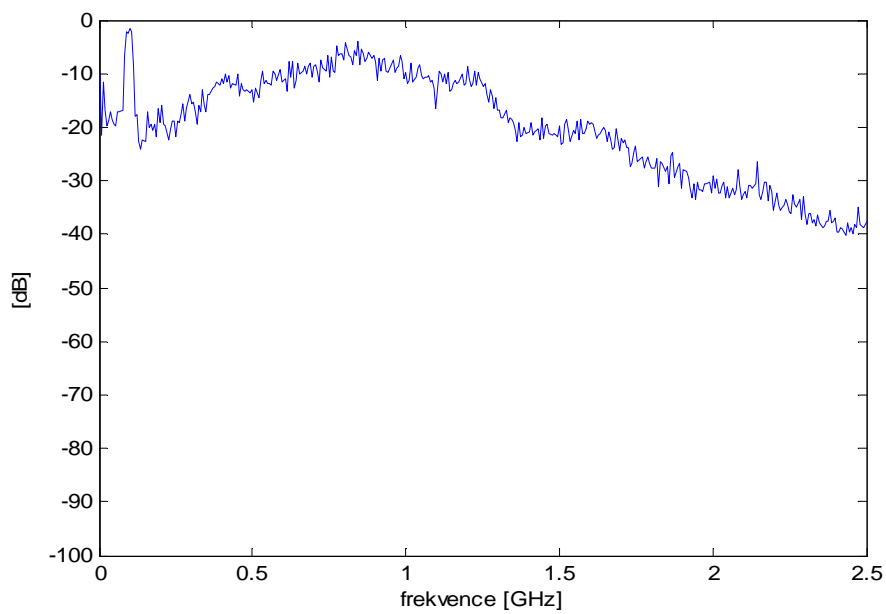
Obr. 26: Spektrum šumu diody BZD27C15

➤ Dioda **BZV55C20** na 20 V



Obr. 27: Spektrum šumu diody BZV55C20

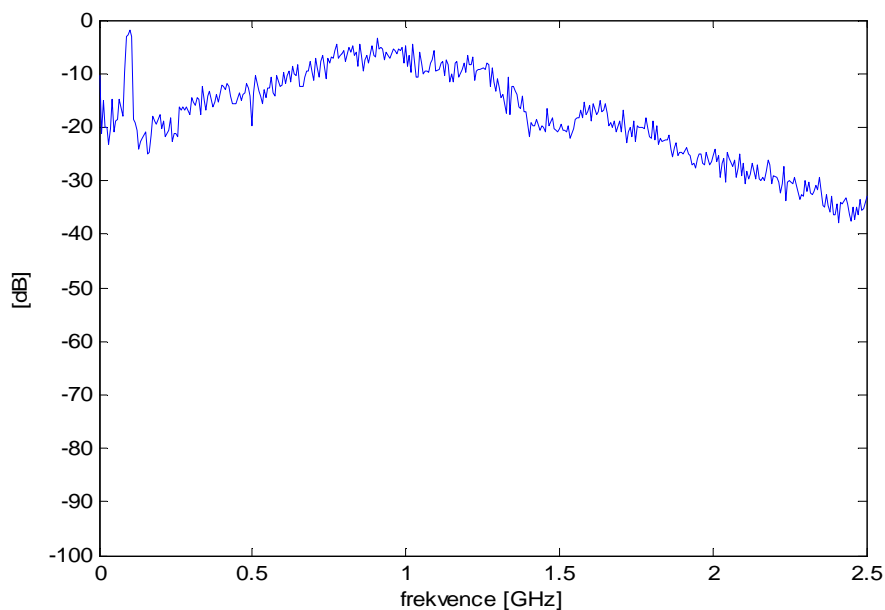
➤ Dioda **BZV55C24** na 24 V



Obr. 28: Spektrum šumu diody BZV55C24



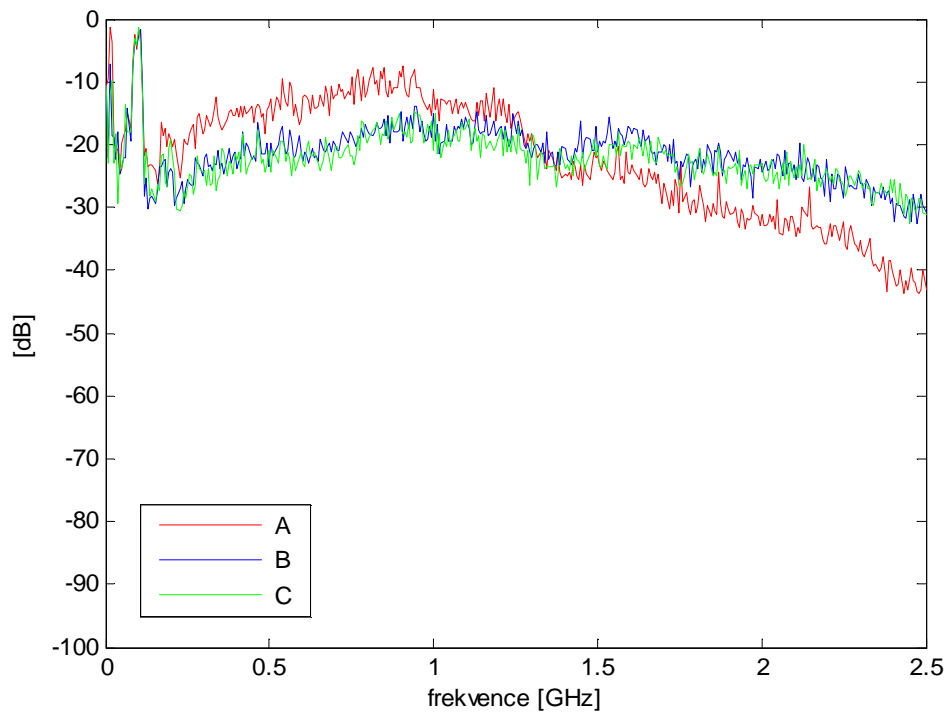
➤ Dioda **BZV49C39** na 39 V



Obr. 29: Spektrum šumu diody BZV49C39

Měření bylo prováděno pomocí spektrálního analyzátoru, který měl schopnost zobrazit spektrum od frekvence 100 kHz do frekvence 6 GHz. Měřeno bylo spektrum pouze do 2,5GHz. Z naměřených průběhu je vidět, že generovaný šum má relativně konstantní úroveň do frekvence přibližně 1,25 GHz, pak spektrum začíná klesat. Při použití některých diod dokonce spektrum klesá už od počátku, což je přibližně od 100kHz. Také je patrné, že lepší šumové vlastnosti mají Zenerovy diody v SMD pouzdře než diody v klasickém pouzdře.

### 6.3 Nastavení pracovního bodu



Obr. 30: Nastavení pracovního bodu

- A..... pracovní bod je nastaven přímo do kolena voltampérové charakteristiky Zenerovy diody. Je dosaženo největší úrovně šumu, ale i nejmenší šířky pásma šumu.
- B..... pracovní bod je nastaven ještě před koleno voltampérové charakteristiky Zenerovy diody.
- C..... pracovní bod je nastaven až za koleno voltampérové charakteristiky Zenerovy diody. Stejně jako v bodě *B* je zde dosaženo menší úrovně šumu, ale větší šířka pásma šumu.

## 7 ZÁVĚR

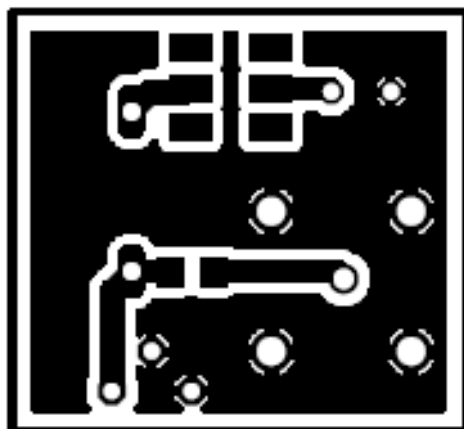
V práci jsou uvedeny některé druhy šumů a barvy šumů. Dále jsou zde popsány různé druhy zdrojů šumu a zapojení generátorů šumu, z nichž byla vybrána jako zdroj Zenerova dioda. Byl navrhnut jednoduchý šumový generátor, pomocí kterého byly testovány náhodně vybrané asi dvě desítky Zenerových diod. Také byl testován vliv nastavení pracovního bodu voltampérové charakteristiky diody, z měření vyšlo jako nejlepší nastavit pracovní bod do kolena charakteristiky. Měření bylo prováděno na spektrálním analyzátoru, který měl schopnost zobrazit spektrum od frekvence 100 kHz do frekvence 6 GHz.

## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

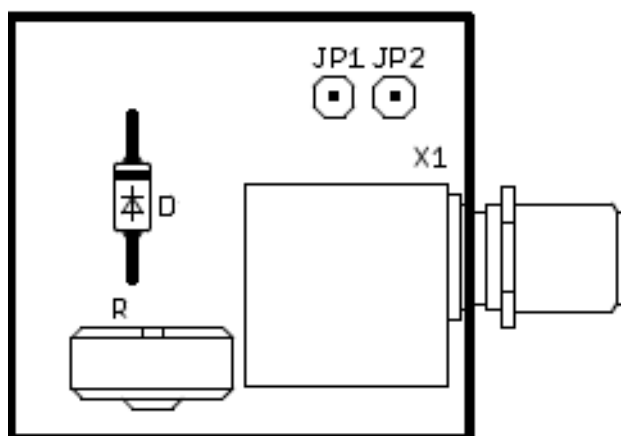
- [1] FUKÁTKO T., FUKÁTKO J., Teplo a chlazení v elektronice II. Praha: BEN – technická literatura, 2006.
- [2] VEDRA J., FISCHER J., Elektronické obvody pro měřicí techniku. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999.
- [3] ŠEBESTA V., SMÉKAL Z., Signály a soustavy: Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně.
- [4] DOSTÁL T., Teorie elektronických obvodů: Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně.
- [5] <http://www.mediacollege.com/audio/noise/>
- [6] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Barvy\\_%C5%A1umu](http://cs.wikipedia.org/wiki/Barvy_%C5%A1umu)
- [7] <http://www.e-automatizace.cz/encyklopedie.asp?Hledat=b>
- [8] <http://homel.vsb.cz/~tum52/publications/StochasticControlTheory.pdf>
- [9] <http://slovníkmidi.info/vyklad/250/>
- [10] [http://www.umt.fme.vutbr.cz/\\_studium/\\_opory/Experimentalni\\_mechanika.pdf](http://www.umt.fme.vutbr.cz/_studium/_opory/Experimentalni_mechanika.pdf)
- [11] [http://www.vabo.cz/stranky/biolek/vyukaVUT/prednasky/BMPS/\\_pro\\_studenty8\\_.pdf](http://www.vabo.cz/stranky/biolek/vyukaVUT/prednasky/BMPS/_pro_studenty8_.pdf)
- [12] <http://www.minicircuits.com/MCLStore/terms.jsp>

## 9 PŘÍLOHY

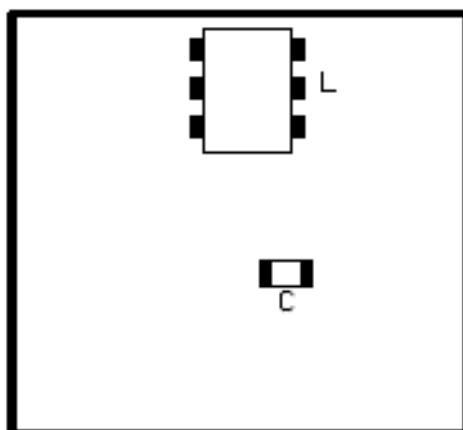
### 9.1 Příloha č. 1 Deska plošného spoje generátoru šumu



## 9.2 Příloha č. 2: Rozmístění součástek na desce plošného spoje strana BOTTOM



### 9.3 Příloha č. 3: Rozmístění součástek na desce plošného spoje strana TOP



## 9.4 Příloha č. 4: Seznam součástek

C.....	kondenzátor.....	106 nF
L.....	indukčnost(TCCH-80).....	1,3 $\mu$ H
R.....	trimer.....	2,2 k $\Omega$
X1.....	zásuvka SMA 50 $\Omega$	
D.....	zenerova dioda	



## 9.5 Příloha č. 5: Fotografie generátoru šumu

